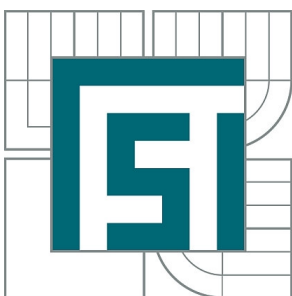


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY ROVINNÝCH SOUČÁSTÍ Z PLECHU

UNCONVENTIONAL MANUFACTURING TECHNOLOGY OF FLAT SHEET METAL PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ALEŠ LANGR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA ŠMEHLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Aleš Langr

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Nekonvenční technologie výroby rovinných součástí z plechu**

v anglickém jazyce:

### **Unconventional manufacturing technology of flat sheet metal parts**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření obecného přehledu a popisu principu nekonvenčních technologií výroby rovinných součástí z plechu. V práci by měl být uveden popis daných metod, používané nástroje a stroje, výhody a nevýhody uvedených metod a dle možností i příklady moderních výrobních postupů a vyráběných součástí.

Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu v oblasti tváření a vytvoření obecného náhledu na technologie výroby rovinných součástí z plechu. Přehled jednotlivých metod včetně popisu principu. Dílčím cílem je vytvoření přehledu užívaných nástrojů a strojů a dle možností i uvedení příkladů moderních výrobních postupů a vyráběných součástí. Vše by mělo být doplněné obrázkovou dokumentací.

Seznam odborné literatury:

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.

ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. Speciální letecké technologie I. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 220 s. ISBN 80-214-0128-1.

NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. Speciální technologie I: Plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. 171 s. ISBN 80-214-0404-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně dne 25.10.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

LANGR Aleš: Nekonenční technologie výroby rovinných součástí z plechu.

---

Nekonenční technologie výroby rovinných součástí z plechu patří světově mezi hojně využívané. Patří sem řezání pomocí laserovým, plazmovým a vodním paprskem a vysekávání. V literární studii jsou uvedeny popisy daných metod, používané nástroje a stroje, výhody a nevýhody uvedených metod a příklady vyráběných součástí. V závěru je uvedeno porovnání jednotlivých metod.

**Klíčová slova:** dělení materiálů, řezání, nekonvenční technologie, laser, plazma, vodní paprsek, vysekávání

## **ABSTRACT**

LANGR Aleš: Unconventional manufacturing technology of flat sheet metal parts.

---

Unconventional manufacturing technology of flat sheet metal parts is used widely all around the world. These technologies includes laser cutting, plasma cutting, waterjet cutting and punching. The study introduces descriptions of chosen methods, used tools and machines, their pros and cons and examples of manufactured components. These methods are compared in conclusion.

**Keywords:** materials cutting, cutting, unconventional technologies, laser, plasma, water jet, punching



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LANGR, Aleš. *Nekonvenční technologie výroby rovinných součástí z plechu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 36 s., 4 přílohy, CD. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 23.5.2012

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji paní Ing. Evě Šmehlíkové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

# OBSAH

Zadání  
Abstrakt  
Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

ÚVOD.....	9
1 VÝROBA ROVINNÝCH DÍLCŮ Z PLECHU.....	10
1.1 Výroba dílců pomocí laserového paprsku.....	11
1.1.1 Řezný proces .....	11
1.1.2 Metody řezání.....	12
1.1.3 Typy laserů .....	13
1.1.4 Stroje.....	15
1.1.5 Výhody a nevýhody řezání laserem .....	16
1.1.6 Součásti vyráběné laserovým řezáním .....	17
1.2 Výroba dílců pomocí plazmového paprsku.....	18
1.2.1 Řezný proces .....	18
1.2.2 Používané plyny .....	19
1.2.3 Typy řezacích plazmových zařízení .....	20
1.2.4 Stroje.....	23
1.2.5 Výhody a nevýhody řezání plazmou .....	24
1.2.6 Součásti vyráběné plazmovým řezáním .....	25
1.3 Výroba dílců pomocí vodního paprsku .....	26
1.3.1 Řezný proces .....	26
1.3.2 Typy vodních paprsků .....	27
1.3.3 Stroje.....	29
1.3.4 Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem .....	30
1.3.5 Součásti vyráběné vodním paprskem .....	31
1.4 Výroba dílců pomocí vysekávání.....	32
1.5 Porovnání vybraných metod .....	34
1.6 Závěr .....	36

Seznam použitých zdrojů  
Seznam použitých symbolů a zkratk  
Seznam příloh

## ÚVOD [13], [14], [26], [28], [35], [55]

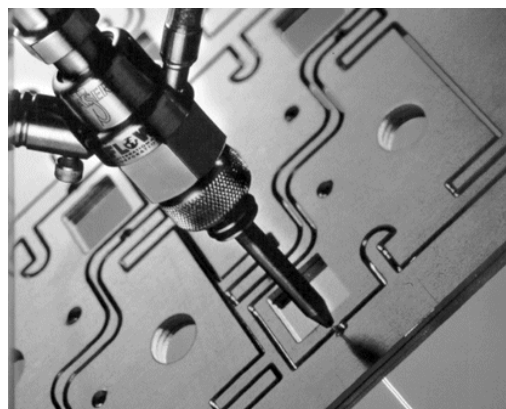
V současné době se pro výrobu průmyslových součástí využívá několik technologií, mezi které patří i tváření. Historie tváření kovů sahá až do doby bronzové, avšak rozvoj teorie tvářecích procesů se začal odehrávat až ve dvacátých letech dvacátého století. Tváření, oproti ostatním druhům výroby, snižuje náročnost výrobního procesu, nemá odpady a zkvalitňuje vlastnosti tvářeného materiálu. Uplatní se jak u velkosériové výroby, tak i u kusové výroby.

Tváření se dělí na plošné a objemové. Plošné tváření je např. stříhání, ohýbání, rovnání, lemování, zakružování a tažení. Objemové tváření zahrnuje pěchování, protlačování, válcování, kování apod. Nedílnou součástí tváření jsou zkoušky mechanických vlastností, zjišťování a klasifikování tvářitelnosti a volba maziva, ovlivňující trvanlivost tvářecích nástrojů, povrch tvářeného materiálu a velikost potřebné tvářecí síly.

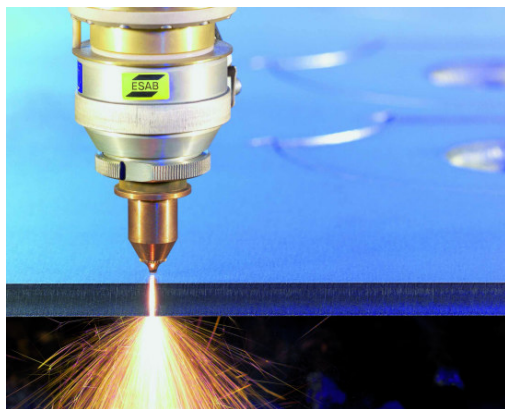
Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na výrobu rovinných součástí z plechu nekonvenčními technologiemi. Tyto technologie, stejně jako konvenční stříhání, jsou charakteristické tím, že přestože se řadí mezi tvářecí operace v oblasti plošného tváření, dochází zde k požadovanému a řízenému porušení celistvosti materiálu. Na Obr. 1 jsou uvedené některé příklady nekonvenčních metod výroby rovinných plechových dílců.



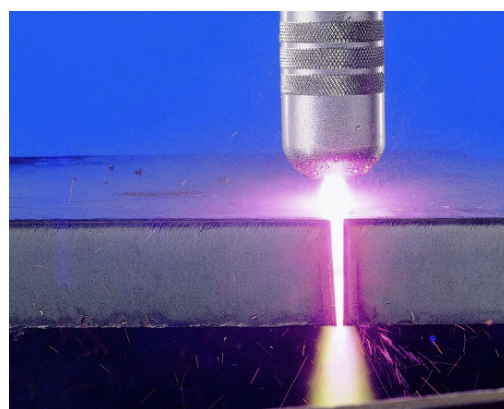
Produkt laserového řezání



Řezání vodním paprskem



Řezání laserem



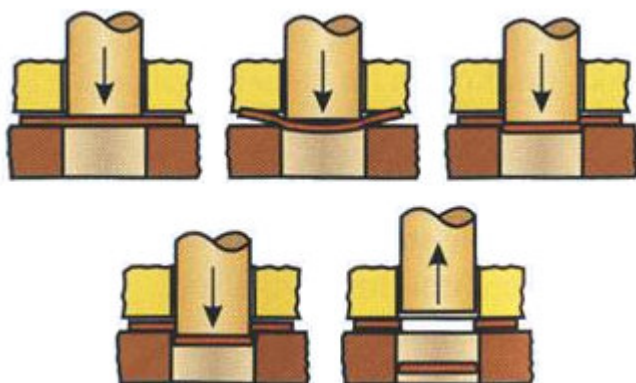
Řezání plazmou

Obr. 1 Produkt a metody výroby rovinných dílců z plechu [28], [35], [55]

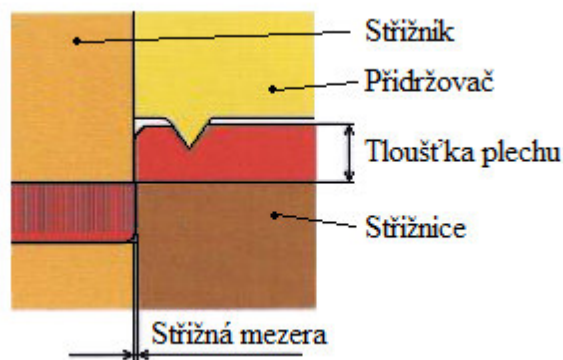
## 1 VÝROBA ROVINNÝCH DÍLCŮ Z PLECHU [13], [23]

Z pásů či z tabulí plechu se vyrábí součásti různých tvarů, více či méně komplikovaných. Jedná se o plošné tváření. Nejrozšířenější způsob výroby těchto tvarových dílců je stříhání. Jedná se o klasický neboli konvenční způsob výroby součástí z plechu s využitím střížných nástrojů, tzv. stříhadel, jejichž princip je znázorněn na Obr. 2. Řadí se sem například postupové stříhání či různé varianty přesného stříhání (stříhání s nátlacnou hranou – Obr. 3, stříhání se zaoblenou střížnou hranou aj.). U přesného stříhání lze dosáhnout rozměrové přesnosti vystřižených dílců hodnot IT6 (pro tloušťku plechu 0,5 až 1 mm) až IT9 (tloušťka plechu nad 6 mm) a drsnosti střížné plochy od  $R_a = 0,4$  až do  $R_a = 1,6$ . U klasického postupového stříhání je obvykle dosahována rozměrová přesnost IT10 až IT12.

Mezi běžně dostupné metody stříhání lze zařadit také stříhání nepevným (elastickým) nástrojem. Zde se však nestříhá pomocí protilehlých kovových nožů, ale pomocí proti sobě jdoucího elastického prostředí (bloku) a střížníku, na kterém leží stříhaný materiál. Jako elastické prostředí se používají pryžové nebo polyuretanové desky. Tato metoda, na rozdíl od výše uvedených, neposkytuje součásti konečných přesných rozměrů a kvalitní střížné plochy, neboť plech je v tomto případě spíše utržen nežli plasticky ustřižen. Je proto nutné zařadit dokončovací operaci, kterou je obrysové frézování. Tyto důvody, mimo jiné, řadí technologii stříhání nepevným nástrojem spíše do oblasti použití v malosériové či kusové výrobě.



Obr. 2 Princip stříhání pomocí stříhadla [23]



Obr. 3 Přesné stříhání s tlačnou hranou [23]

Vlivem technického pokroku, urychlujících a modernizujících výrobních postupů se v dnešní době pro výrobu komplikovaných rovinných součástí z plechu využívají i metody nekonvenční, kam řadíme např.:

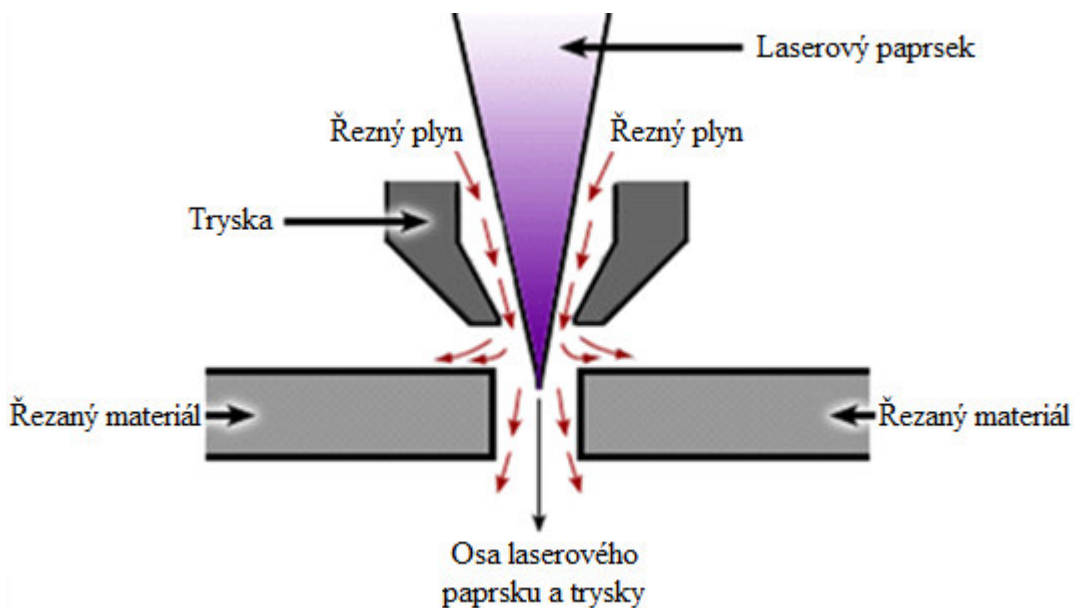
- výrobu dílců pomocí laserového paprsku
- výrobu dílců pomocí plazmového paprsku
- výrobu dílců pomocí vodního paprsku
- výrobu dílců pomocí vysekávání

## 1.1 Výroba dílců pomocí laserového paprsku [10], [20], [24]

Řezání laserem patří mezi nejnovější metody. Řezání se provádí převážně pomocí CNC programování. Název LASER je složen z počátečních písmen anglického popisu dané metody Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla stimulovanou emisí záření). Laser existuje více jak 50 let. V roce 1960 Theodore Maiman, C. K. Asawa a I. J. D'Haenens sestrojili první fungující laser v Hughesových výzkumných laboratořích.

### 1.1.1 Řezný proces [10], [20], [24]

Pomocí laseru je možné řezat jakýkoli technický materiál, nehledě na jeho tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti. Řezání se provádí pomocí laserového paprsku a řezného plynu. Řezná spára je ohraničená oblast, kde dochází k řezu. Laserový paprsek (10 000 °C) dopadající na materiál ohřívá kontaktní místo na teplotu varu, až se daný materiál začne odpařovat. Poté pomocí řezného plynu dochází k odstraňování par kovů a taveniny z prostoru řezné spáry. Řezný plyn obklopuje laserový paprsek a za vysokých tlaků vystupuje řezací tryskou, která je od povrchu materiálu vzdálena maximálně 1 mm. Vzdálenost se sleduje pomocí kapacitního nebo dotykového čidla. Při souvislém řezu reprezentuje laserový paprsek řezný nástroj. Princip řezání laserem je znázorněn na Obr. 4.



Obr. 4 Princip řezání laserem [20]

Díky vysokému výkonu laserového paprsku se docílí kvalitního úzkého řezu s malou tepelně ovlivněnou oblastí. Řezání mechanicky nepůsobí na řezaný materiál a vytváří se pouze malé deformace. Proto je možné laserem vyrábět součásti s vysokou přesností.

Charakteristické rysy řezného procesu:

- řezná rychlost
- šířka řezu
- tepelně ovlivněná oblast
- rýhy způsobující drsnost řezné plochy

### 1.1.2 Metody řezání [20], [24]

Metody řezání laserem se podle řezného plynu dělí na:

- sublimační řezání
- tavné řezání
- oxidační řezání

#### Sublimační řezání [20], [24]

U sublimačního řezání zahřeje pulzní laserový paprsek materiál na teplotu varu a poté dojde k jeho silnému odpaření. Páry materiálu jsou odváděny mezi jednotlivými pulzy nebo jsou odstraňovány proudem pracovního řezného plynu. Z hlediska minimalizace tavných zón, vzniklých na hranách řezů, jsou třeba vysoké hustoty energií laserového paprsku. Musí se dávat pozor, aby páry materiálu zase nezkondenzovaly a nesvařily řez. Tomu se u materiálů, u kterých se vytváří kapalná fáze, zabráni tak, že tloušťka řezaného materiálu nesmí být větší než průměr paprsku. U netavících materiálů nemusíme brát ohled na tloušťku řezaného materiálu. Řezná rychlost roste s růstem rychlosti proudění pracovního plynu a klesá s rostoucím odpařovacím teplem materiálu. Metoda se používá pro tenké plechy a hlavně minerály. V současnosti je však tato metoda na ústupu.

#### Tavné řezání [20], [24]

U tavného řezání zahřeje souvislý laserový paprsek materiál na teplotu tavení a poté neaktivní vysoce čistý inertní plyn ( $N_2$ ) vyfoukne taveninu z řezné spáry. Vliv šířky spáry, použitého plynu a druhu materiálu má za následek vysoké povrchové napětí taveniny, a proto musí metoda pracovat s vysokým tlakem (10 až 15 barů) pracovního plynu. Tlak je nepostradatelný také pro zamezení ulpění taveniny na dolní hraně řezu. Při použití dusíku jako inertního plynu a vysokých tlaků (1 až 2 MPa) na trysce má řez kovově lesklý povrch nevyžadující žádné další úpravy. Kvalita řezaného materiálu může způsobit vznik otřepů na dolní hraně řezu. Řezný proces je pomalý, s rostoucím výkonem laseru roste řezná rychlost, a naopak klesá s tloušťkou řezaného materiálu. Řezná rychlost je v porovnání s ostatními metodami nižší. Roste s výkonem laseru a klesá s teplotou a tloušťkou řezaného materiálu. Metoda se využívá pro vysokolegované oceli, měď, nikl, hliník a jejich slitiny. Také se může použít pro nekovové materiály (keramika, dřevo, plasty, sklo,...).

#### Oxidační řezání [20], [24]

Oxidační řezání pracuje oproti tavnému s kyslíkovým pracovním plynem o nižším tlaku, který se pohybuje od 3 do 5 barů. Kyslík spolu s nataveným kovem reaguje a vzniká exotermická reakce (uvolňování tepla a světla), což vede k dalšímu ohřevu materiálu. Uvolněné teplo při exotermické reakci se využívá k přehřevu okolí řezu a ohřevu vzniklých par a taveniny. Řezné rychlosti a tloušťky řezů jsou větší u oxidačního řezání oproti tavnému. Metoda se využívá pro nelegované (hladký povrch řezu se slabou vrstvičkou oxidů) až středně legované oceli. S jinými kovy kyslík reaguje a dochází k oxidaci řezných ploch.



### 1.1.3 Typy laserů [21], [31]

Všechny typy laserů fungují na stejném principu, a to zesílením světla stimulovanou emisí záření. Odlišují se však stavbou a vlastnostmi.

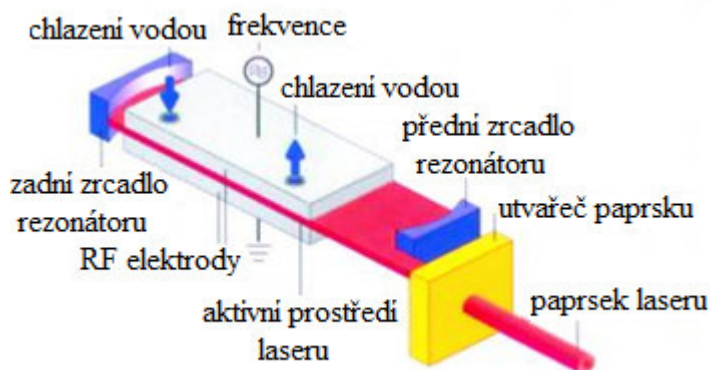
Rozdělení typů laserů lze provést podle několika různých hledisek, např. podle:

- aktivního prostředí (plynové, pevnolátkové, kapalinové, polovodičové, plazmatické)
- režimu práce (impulzní, kontinuální)
- počtu energetických hladin (dvou, tří a vícehodinové)
- buzení (optické, elektrickým polem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, tepelnou změnou, ...)
- vlnových délek (viditelné světlo, submilimetrové, ultrafialové, infračervené, rentgenové)

Rozdělení typů laserů je stále pouze u hlediska dělení dle aktivního prostředí. Ostatní skupiny se vlivem vývoje obměňují. Proto se dále budeme zabývat pouze rozdělením dle aktivního prostředí.

#### Plynové [21], [31], [39]

Plynové lasery jsou jedny z nejstarších typů. Aktivní prostředí zde představuje plyn nebo směs plynů, což vede k široké nabídce jednotlivých druhů plynových laserů. Prostor je homogenní, a to má vliv na dobré parametry. Pracují v kontinuálním i impulzním režimu. Buzení se provádí především pomocí elektrického výboje. Budit lze také opticky, chemickou reakcí, elektronovým svazkem apod. Nevýhodou plynových laserů je malý výkon. Nejrozšířenější plynový laser je infračervený helium-neonový. Vybuzené atomy neonu zde představují aktivní prostředí. Buzení se provádí pomocí elektrického výboje ve směsi helia a neonu. Uplatnění nachází v měřicí technice, holografii a geodézii. V průmyslu je nejpoužívanější infračervený laser CO<sub>2</sub> (Obr. 5), který je ze všech typů nejvýkonnější. Středně výkonné CO<sub>2</sub> lasery (500 až 6000 W) jsou schopny řezat ocelový plech do tloušťky 25 mm (docílilo se až 40 mm), dále k řezání trubek a profilů. Lze také řezat hliník do tloušťky 15 mm a mosaz do 8 mm. CO<sub>2</sub> lasery s výkonem pod 500 W se používají pro řezání, svařování a opracování užších plechů, popřípadě opracování nekovových materiálů, a lasery s výkonem nad 6000 W se využívají převážně pro svařování. U CO<sub>2</sub> laserů je aktivní prostředí

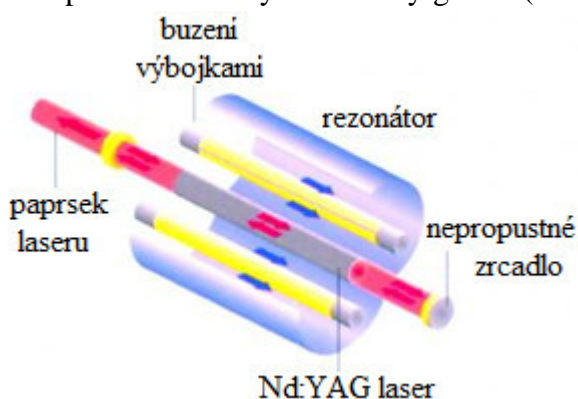


tvořeno molekulami oxidu uhličitého. Buzení se provádí elektrickým výbojem zapalujícím směs plynů CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He. Tyto lasery najdou uplatnění nejen u řezání materiálu, ale také u vrtání, svařování, gravírování, povlakování a u tepelného zpracování.

Obr. 5 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru [31]

### Pevnolátkové [21], [31], [39]

Pevnolátkové lasery s výkonem do 10 kW jsou jedny z nejpoužívanějších typů. Aktivním prostředím se zde rozumí pevná krystalická - eventuálně amorfni - látka s příměsí vhodného plynu. Obvykle provedené pevnolátkové lasery tvarují aktivní prostředí do tvaru válečku. Dané lasery jsou určeny pro práci v odlišných režimech a za různorodých provozních podmínek. Vyznačují se stabilitou a nízkými požadavky na údržbu. Nejproslulejším pevnolátkovým laserem je rubínový, kde aktivní prostředí tvoří krystal syntetického rubínu. Obvykle pracuje v impulzním režimu. Používá se především pro vrtání tvrdých materiálů, ale nachází své uplatnění i v jiných oborech, jako je lékařství a laserová lokace družic. V dnešní době je nejpoužívanějším pevnolátkovým laserem Nd:YAG laser (Obr. 6), kde aktivní prostředí tvoří yttrio-hlinitý granát (YAG) obohacený o neodym, a přenos paprsku se



provádí optickým kabelem. Pracuje v kontinuálním i impulzním režimu a dosahuje výkonů až 4 kW. Používá se pro řezání, vrtání, svařování a žhání. Uplatnění nachází také v radarové technice, ve spektroskopii a také v lékařství (chirurgie - skalpel, oční mikrochirurgie). Dalšími pevnolátkovými lasery jsou např. Nd:sklo laser, Er:YAG laser, apod.

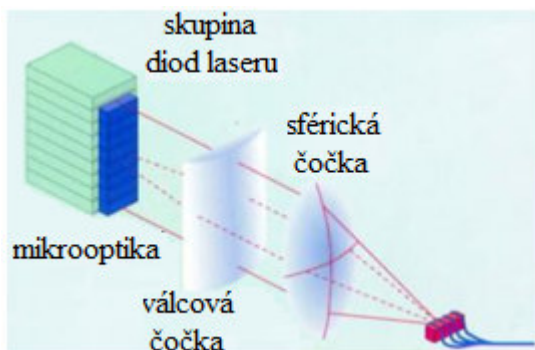
Obr. 6 Konstrukce Nd:YAG laseru [31]

### Kapalinové [21], [31]

U kapalinových laserů se aktivním prostředím rozumí roztoky organických barviv, eventuálně speciálně vytvořené kapaliny s příměsí vzácných zemin. Používají se výhradně ve spektroskopii. Vlivem tepla a světla se aktivní prostředí rozkládá, což má za následek jeho krátkou životnost.

### Polovodičové [21], [31], [39]

Polovodičové lasery, též nazývány jako diodové lasery, jsou v dnešní době jedny z nejrozšířenějších. Jako aktivní prostředí se používají nerovnovážné elektrony a díry (volné nosiče náboje) nacházející se v polovodičovém materiálu. Zdroj záření je laserová dioda. Polovodičové lasery jsou kompaktní a mají velkou účinnost (až 50 %). Jejich výkon se může lehce měnit pomocí elektrického proudu a může dosahovat až 8000 W. Nevýhodou je větší rozbíhavost paprsku než u ostatních laserů. Polovodičové lasery s výkonem do 250 W

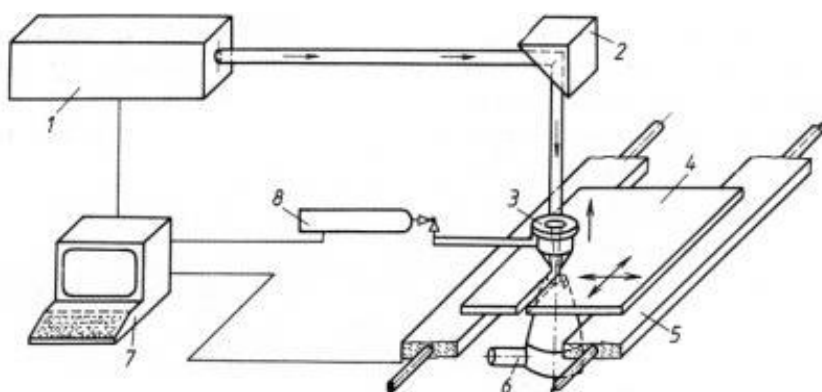


nacházejí uplatnění hlavně v řezání a svařování plastů, popř. kovových fólií, s výkony v řádech tisíců W se používají ke svařování s vedením tepla, k vytvrzování a pájení natvrdo. Další využití těchto laserů je gravírování, použití v technologii Rapid Prototyping a také ve výpočetní technice a spotřební elektronice. Na Obr. 7 je znázorněna konstrukce diodového laseru.

Obr. 7 Konstrukce diodového laseru [31]

### 1.1.4 Stroje [1], [32]

Existuje mnoho výrobců laserových strojů, a to Trumpf, Rofin-Sinar, Bystronic, LaserPro, Amada, MicroStep a mnoho dalších. Schéma zařízení pro laserové řezání je zobrazeno na Obr. 8. U nás je nejznámější výrobce Trumpf, který nabízí hned několik zařízení dělících se do různých kategorií (sérií) od jednoduchých kompaktních strojů, za výhodnou cenu a se snadnou obsluhou, až po vysoce přesné stroje pro sériovou a masovou produkci.



Obr. 8 Schéma zařízení pro laserové řezání [32]

- 1 - laser,
- 2 - zrcadlo,
- 3 - pracovní řezací hlava,
- 4 - obrobek,
- 5 - pracovní stůl stroje,
- 6 - odsávání zplodin,
- 7 - CNC řídicí systém,
- 8 - zásobník a regulace průtoku řezného plynu

#### Trumpf - TruLaser 3030 [46]

Tento typ laseru zastupuje sérii standardních univerzálních strojů a slučuje velký výkon laseru a inovační technologie s novým pojetím vzhledu a optimalizovaným ovládáním. Zařízení disponuje velmi krátkými vedlejšími časy, protože obsahuje jednu řezací hlavu, automatický měnič trysek, integrovaný výměník palet sloužící k rychlé výměně tabulí plechu. Krátké prostoje jsou zaručeny podélným pásovým dopravníkem odvádějícím strusku a malé díly. Laserové zařízení TruLaser 3030 (příčná instalace) a automatický měnič trysek je na Obr. 9.

Základní informace zařízení:

- velký výkon laseru
- nové pojetí obsluhy s dotykovou obrazovkou a grafickou ovládací plochou
- jedna řezací hlava pro jakoukoli tloušťku plechu (až 25 mm)
- kompaktnost (instalace zařízení napříč nebo podélně)
- automatický měnič trysek
- hmotnost 12000 kg
- velmi dobrý poměr cena / výkon



Obr. 9 Laserové zařízení TruLaser 3030 (příčná instalace) a automatický měnič trysek [46]

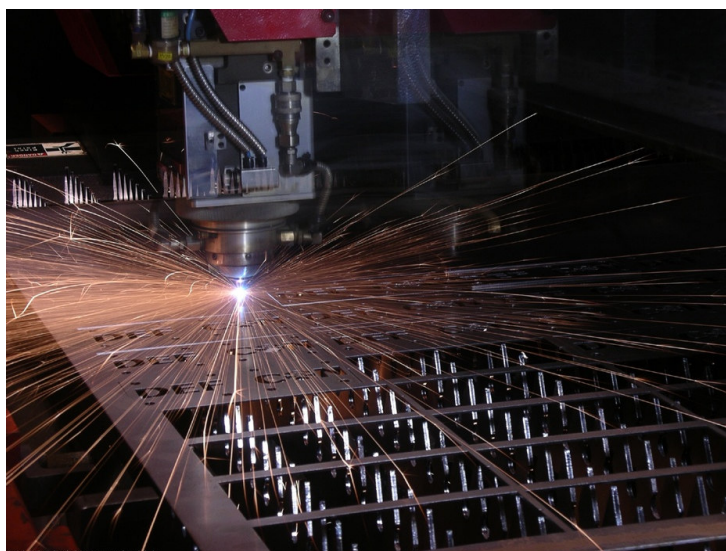
### 1.1.5 Výhody a nevýhody řezání laserem [20], [24], [30], [32]

#### Výhody laserového řezání:

- možnost řezat jakýkoli technický materiál
- možnost řezat malé otvory, úzké pásy, ostroúhlé tvary
- vysoké řezné rychlosti (metry až desítky metrů za minutu)
- možnost řezat materiál do tloušťky 40 mm (Tloušťka je dána řezaným materiálem.)
- přesnost řezu kolem 0,05 až 0,1 mm na metr délky řezu
- úzká řezná spára (kolem 0,05 mm) – malé množství odpadu
- malá velikost tepelně ovlivněné oblasti
- kvalitní povrch řezu na celé jeho ploše (V rozích je výkon laseru redukován v závislosti na řezné rychlosti.)
- řezná hrana bez zkosení - pravouhlá
- drsnost povrchu řezu cca Ra 1,6
- schopnost provádět 2D (Obr. 10) i 3D řezy
- schopnost provádět řezy komplikovaných tvarů
- neopotřebitelnost nástroje (laserového paprsku)
- hospodárnost i u malosériové výroby (Jedním laserovým zařízením lze zhotovit více různých dílců najednou.)
- možnost automatizace výroby

#### Nevýhody laserového řezání:

- vysoké pořizovací a provozní náklady – velká spotřeba plynů
- malá vzdálenost mezi tryskou a řezaným materiálem
- menší účinnost CO<sub>2</sub> laserů



Obr. 10 Řezání 2D laserem [20]



### 1.1.6 Součásti vyráběné laserovým řezáním [17], [34], [35], [48]

Pomocí laserového paprsku se dají vyrábět součásti různých rozměrů, více či méně tvarově komplikovaných (Obr. 11a). Součást vyřezaná ze dřeva pomocí laseru je na Obr. 11b.



Obr. 11a Příklady dílců vyrobených pomocí laserového paprsku [17], [34], [35]



Obr. 11b Dřevěná převodová kola hodin [48]

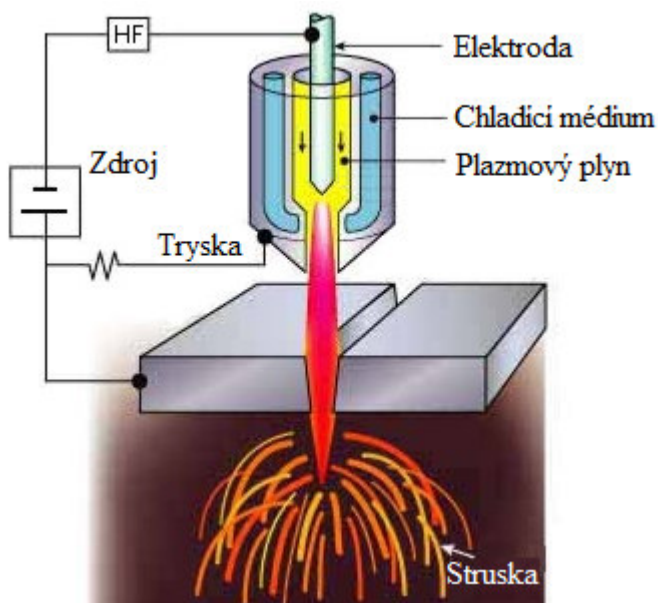
## 1.2 Výroba dílců pomocí plazmového paprsku [15], [19], [20]

Řezání plazmou patří mezi nejrozšířenější řezací technologie v současnosti. I zde, tak jako u řezání pomocí laserového paprsku, se řezání provádí převážně pomocí CNC programování. Plazmou označil v roce 1923 francouzský fyzik I. Langmuir speciální stav plynů, který bývá nazýván čtvrtým stavem hmoty. V USA roku 1957 byl patentován první plazmový řezací hořák jako modifikace TIG hořáku.

Plazma vzniká mechanickou nebo tepelnou ionizací plynu, kdy dochází k uvolňování elektronů z valenčních orbitalů atomů. Tyto elektrony se záporným nábojem vedou v plazmě elektrický proud. Kladný náboj má ionizované jádro atomu neboli iont se zbylými elektrony. Plazma je tedy ionizovaný elektricky vodivý plyn a navenek se jeví jako elektricky neutrální. Uvolnění elektronů vyžaduje velké množství energie. V praxi se využívá elektrický kontrahovaný oblouk jako zdroj tepla a vyšší teplotou se docílí vyššího stupně ionizace.

### 1.2.1 Řezný proces [6], [19], [20], [33]

Pomocí plazmy je možné řezat všechny kovové a vodivé materiály např. uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, barevné kovy (hliník, slitiny hliníku,...) apod. Při nezávislém zapojení lze řezat omezeně i nevodivé materiály. Při řezání plazmovým paprskem vzniká mezi řezaným materiálem a tryskou elektrický oblouk, který se získá přivedeným elektrickým napětím. Plazmový plyn proudí z trysky vysokou výstupní rychlostí ( $1\,500$  až  $2\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) při velmi vysoké teplotě (až  $20\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a vyfukuje natavený materiál z řezné spáry. Na úplnou



Obr. 12 Princip řezání plazmou [6]

ionizaci plynu je třeba  $100\,000\text{ K}$ , tudíž dochází jen k částečné ionizaci. Zneionizovaný plyn tvoří studenější vrstvu stabilizující plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se paprsek přímo nedotýkal stěny trysky. I tak musí být tryska ochlazována chladicím médiem, nejčastěji vodou, která zabraňuje roztečení trysky. Při vybraných procesech je možno umístit řezaný materiál do vody, díky čemuž se zabraňuje hluku a dýmu. Dle použití se volí složení plazmového plynu, nejčastěji je to  $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  a jejich směsi. Plazmový paprsek reprezentuje řezný nástroj. Princip řezání plazmou je na Obr. 12.

Řeznou rychlost ovlivňuje výkon zdroje, tloušťka, druh a fyzikální vlastnosti řezaného materiálu. Řezná rychlost tenkých plechů je v rozmezí od  $9$  do  $12\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Lze řezat materiál do tloušťky  $250\text{ mm}$ . Při řezání se používají zdroje s vysokým napětím naprázdno od  $250$  do  $350\text{ V}$  a při samotném řezání napětí dosahuje hodnot od  $110$  do  $150\text{ V}$ .

Nejdříve při řezání se HF ionizátorem (vysokofrekvenčním jiskrovým výbojem) zapálí na  $6$  až  $10$  sekund tzv. pilotní oblouk mezi elektrodou a tryskou. Tím se provede ionizace místa mezi elektrodou a řezaným materiálem. Poté dojde k zapálení tzv. hlavního řezacího oblouku.

### 1.2.2 Používané plyny [15], [19], [33], [40]

Používané plyny u plazmových technologií:

- Plazmové plyny – ionizují a disociují se v elektrickém oblouku. Složení plazmového plynu: Ar, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, jejich směsi a popř. vzduch.
- Fokusační plyny – zaostrují plazmový paprsek při jeho opouštění trysky. Používá se Ar, N<sub>2</sub>, směs Ar + H<sub>2</sub>, popř. Ar + N<sub>2</sub>.
- Asistentní plyny – zahalují plazmový paprsek a pracovní místo na řezaném materiálu a chrání je před vlivem okolního prostředí. Používá se Ar a N<sub>2</sub>.

Přehled plynů a jejich fyzikálních vlastností je uveden v Tab. 1. Plazmový a asistentní plyn je závislý na typu a tloušťce řezaného materiálu a jejich kombinaci uvádí výrobce zařízení. Volba plazmového plynu se nejčastěji provádí následovně:

- konstrukční ocel: O<sub>2</sub>, vzduch
- vysokolegovaná ocel: Ar + H<sub>2</sub>, Ar + H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>, Ar + N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, vzduch
- lehké kovy: Ar + H<sub>2</sub>, vzduch
- barevné kovy: Ar + H<sub>2</sub>
- kompozitní materiály: Ar + H<sub>2</sub>, Ar + H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, vzduch

Čistota plazmového plynu má velký vliv na kvalitu řezu a také na opotřebení spotřebních částí hořáku.

Tab. 1 Přehled plynů a jejich fyzikálních vlastností [15]

Plyn	Teplota varu [°C]	Rel. Hustota [vzduch = 1]	Ionizační energie [eV]	Chemická aktivita	Teplota plazmového paprsku [K]
Vodík (H <sub>2</sub> )	- 252,9	0,06	13,59	Redukční	10 000
Argon (Ar)	- 185,9	1,38	15,76	Interní	16 000
Dusík (N <sub>2</sub> )	- 195,8	0,91	14,55	Interní	9 000
Kyslík (O <sub>2</sub> )	- 183	1,04	13,62	Oxidační	-

Pro lepší manipulaci se veškeré plyny plní do tlakových lahví (Obr. 13).



Obr. 13 Tlakové láhve [40]

### 1.2.3 Typy řezacích plazmových zařízení [20]

Typy řezacích plazmových zařízení (Tab. 2):

- vzduchová
- plynová
- kyslíková
- dusíková (kombinovaná s vodou)
- stabilizovaná vodní parou
- HD - High Definition plazma

Tab. 2 Typy a porovnání řezacích plazmových zařízení [20]

Typ plazmy	Rychlost řezání	Kvalita řezu
vzduchová	vysoká	průměrná
plynová	nízká	vysoká
kyslíková	vysoká	vysoká
dusíková (kombinovaná s vodou)	vysoká	vysoká
stabilizovaná vodní parou	vysoká	vysoká

#### Vzduchová plazma [20]

V dnešní době je vzduchová plazma velice využívaná a z hlediska ekonomického je vhodná na řezání materiálu do tloušťky 40 mm. Stlačený vzduch o průtoku až  $130 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  a o tlaku 0,4 až 0,8 MPa zaručuje stabilitu paprsku. Vysoký průtok vzduchu má nejen vliv na ochlazování hořáku, ale i na ochlazování zevní vrstvy plazmy, kterým se získá díky kontrakci plazmového paprsku rovnoběžná úzká řezná spára. Výhody vzduchové plazmy oproti plynové jsou větší tepelná kapacita a vysoká řezná rychlost. Dochází pouze k částečnému spalování řezaného materiálu kyslíkem, ale ve studenější oblasti (dolní straně) řezu nastává vyšší oxidace, která způsobuje čistou dolní hranu řezu. Vzduchová plazma se nejčastěji používá u nelegovaných a středně legovaných ocelí. Kvůli velké reakční schopnosti vzduchu se musí použít elektroda zirkonová nebo hafniová, jejichž teplota tavení oxidů a nitridů je vysoká, a to v rozmezí 2 500 až 3 300 °C. Teplota tavení oxidů u wolframové elektrody je pouze 1 270 až 1 473 °C. Životnost elektrod je malá, i když hafniová má niklové pouzdro měděného nosiče.

#### Plynová plazma [20]

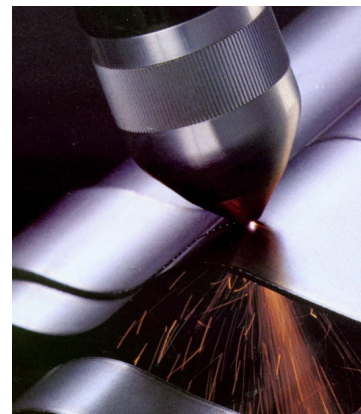
Plynová plazma má wolframovou elektrodu a nejčastěji se používá při řezání vysokolegovaných ocelí, Ni, Mo, Cu a dalších kovů. Stabilizace se provádí pomocí směsi Ar a H<sub>2</sub>. Směsí Ar a H<sub>2</sub> od 5 do 35 % lze docílit vhodných výsledků u většiny kovů se zřetelem na řeznou rychlost, teplotu plazmy a kvalitu řezné plochy. Místo H<sub>2</sub> se používá i N<sub>2</sub> popř. trojsložková směs. Výhoda plynové plazmy oproti řezání kyslíkem je mnohem vyšší řezná rychlost u materiálů s malou tloušťkou. Řezné rychlosti u těchto dvou způsobů řezání se dorovnají v rozmezí tloušťky materiálů 20 až 35 mm.



### Kyslíková plazma [20]

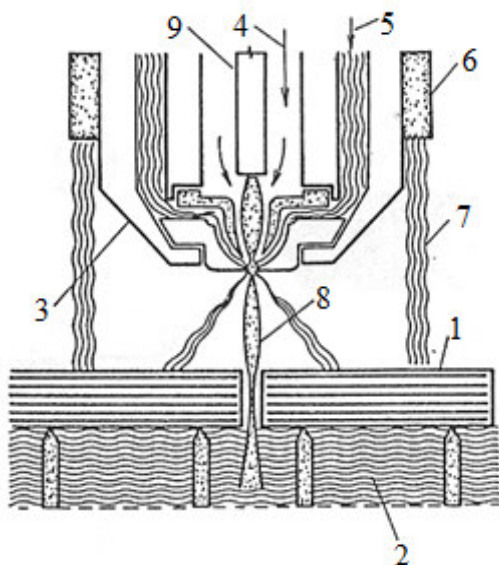
Obdoba vzduchové plazmy je kyslíková, má ale větší hustotu a entalpii. Kyslík zajišťuje vysokou řeznou rychlost, čisté řezy bez oxidů a zvyšuje jakost řezu s malým deviačním úhlem a jemnou strukturou povrchu. Řezání kyslíkovou plazmou zachycuje Obr. 14.

Obr. 14 Řezání  
kyslíkovou plazmou [20]



### Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody [20]

Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody se nejčastěji používá pro řezání vysokolegovaných ocelí velkých tloušťek. Princip spočívá v tangenciálním přívodu vody (popř. oxidu uhličitého) ke krajním vrstvám plazmového paprsku, u kterého dochází k zúžení a zvýšení teploty díky disociaci vody při ochlazení zevní vrstvy plazmy. Výhody dusíkové plazmy kombinované s injekčním přívodem vody spočívají ve zlepšování kvality řezné plochy, její kolmosti a zvyšování řezné rychlosti. Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody může být doplněna o vodní sprchu (Obr. 15), nebo se zapálený hořák potopí do vody, což navyšuje hygienu práce.



- 1 dělený materiál
- 2 vodní lázeň
- 3 hubice plazmatronu
- 4 plazmový plyn
- 5 voda
- 6 vnější plášť vodní sprchy
- 7 vodní sprcha
- 8 plazmový paprsek
- 9 wolframová elektroda

Obr. 15 Dusíková plazma s injekcí vody [20]

### Plazma stabilizovaná vodní parou [11], [20]

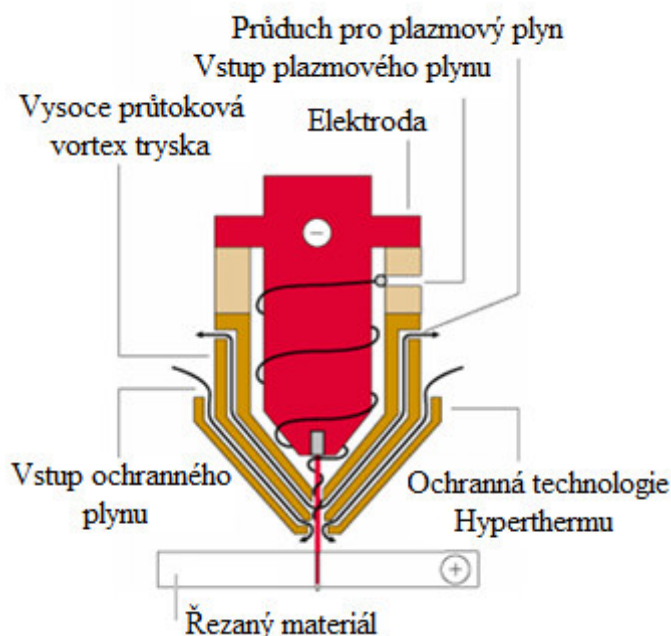
Plazma stabilizovaná vodní parou byla vyvinuta firmou Fronius a její výhoda spočívá ve vysoké mobilitě, která je zajištěna nezávislostí na přívodu plynu nebo stlačeného vzduchu. Tato plazma je generována disociací a ionizací odpařené demineralizované (bez iontově rozpustných látek a Si) vody v topném tělese hořáku. Plazma složená z 66 %  $H_2$  zaručuje výborné redukční účinky a pouze slabou vrstvu oxidů na řezných hranách.

### HD – High Definition plazma [18], [19], [20]

HD – High Definition plazma (Obr. 16) má vysokou koncentraci paprsku a jedná se o nejnovější způsob řezání materiálu pomocí plazmového paprsku. Plazmový hořák si pro tuto metodu nechala patentovat firma Hypertherm a úplný název metody je „High Tolerance Plasma Arc Cuting“. Princip (Obr. 17) spočívá v odvádění zevní chladnější vrstvy plazmy, což vede k velikému zúžení plazmového paprsku, který má při výstupní rychlosti a současném ohřívání až třikrát vyšší hustotu energie. Výhody HD plazmy jsou nárůsty řezných rychlostí, téměř kolmé řezné plochy bez otřepů na dolních hranách plechů a poloviční zúžení řezných spár. U tloušťek do 10 mm je odchylka kolmosti 1 až 2°. Použijeme-li velmi čistý kyslík (99,95 %) jako plazmový plyn, dosáhneme srovnatelné kvality řezné plochy u nelegované oceli jako při řezání laserem. Směs dusíku (99,999 %) a kyslíku se používá především pro řezání vysokolegovaných ocelí, Al a Cu. High Definition plazma je přijatelná náhrada laserového řezání s menšími pořizovacími ale také provozními náklady.



Obr. 16 HD plazma [18]

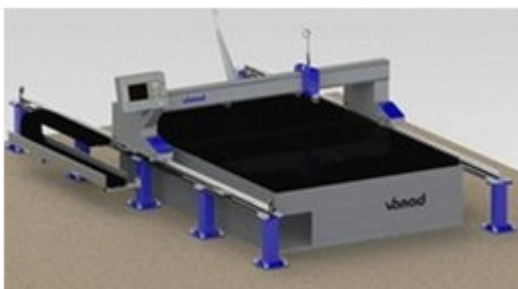


Obr. 17 Princip High Definition plazmy [20]

### 1.2.4 Stroje [9]

Existuje mnoho výrobců plazmových strojů, a to Vanad 2000 a.s., Hypertherm, SteelTailor, Kjellberg Finsterwalde, MicroStep a mnoho dalších. CNC pálicí stroje firmy Vanad 2000 a.s. disponují vysokou technickou úrovní. Vyrábí výkonné zařízení pro řezání pomocí plazmového paprsku. Nabízí ekonomickou řadu Arena, výkonnou řadu Kompakt či špičkovou řadu Proxima.

MIRA [9], [25]



Obr. 18 CNC pálicí stroj MIRA [9]

Jedná se o CNC pálicí stroj firmy Vanad 2000 a.s. (Obr. 18) vycházející z pojetí portálových řezacích strojů stanovených pro plazmové a kyslíkové dělení plechů. Pracoviště je variabilně provedeno ve své velikostní řadě a umožňuje použití víceportálových linek zaměřených na dílčí technologie. Osvědčený systém Vanad BR zajišťuje řízení stroje. Označení BR symbolizuje vysokou úroveň průmyslových součástí od světového výrobce B&R automatik, dále označení BR je symbolem spolehlivosti stroje a ověřené vysoké kvality všech prvků. Software řídící řezací pracoviště umožňuje docílit i nepřítli zkušene obsluze výborných výsledků a zároveň velmi zkušena obsluha ocení jeho propracovanost, mnoho funkcí a nastavení. Ovládání se provádí pomocí panelu PP500BR, což je dotykový LCD display o úhlopříčce 10,1“ s technologickou klávesnicí. Základní informace stroje MIRA jsou uvedeny v Tab. 3. Ukázka řezání a LCD display je na Obr. 19.

Tab. 3 Základní informace stroje MIRA [25]

Výkon pohonů	1500 ot·min <sup>-1</sup> , 2,2 Nm
Maximální pracovní rychlost	dle technologie a materiálu
Maximální přesunová rychlost	13 m·min <sup>-1</sup>
Přesnost polohování	±0,25 mm
Opakovaná přesnost	±0,1 mm
Přesnost úhlopříčky	±0,5 mm·m <sup>-1</sup>
Max. pracovní zrychlení	0,15 m.s <sup>2</sup>
Rychlost zvedání hořáků	3,5 m·min <sup>-1</sup> (plazma)
Přesnost nastavení zapalovací výšky plazmy	±0,1 mm
Dráha X / Y	ložisková / lineární vedení
Osa Z	lineární vedení
Přejezd v ose X / Y	3060/6060 mm / 2130 mm



Obr. 19 Ukázka řezání a LCD display [25]

### 1.2.5 Výhody a nevýhody řezání plazmou [2], [19], [20], [22]

#### Výhody plazmového řezání:

- možnost řezat jakýkoli kovový a vodivý materiál např. uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, barevné kovy (hliník, slitiny hliníku,...)
- možnost řezat pod vodou – zabraňování hluku a dýmu v okolí pracoviště, menší tepelně ovlivněná oblast
- možnost řezat materiál do tloušťky 250 mm (Tloušťka je dána řezaným materiálem.)
- jednoduchá automatizace a mechanizace
- velké výkony při řezání do tloušťek 30 mm
- velké řezné rychlosti (až 10x větší než u kyslíkového řezání)
- kvalita řezné plochy srovnatelná s laserovým řezáním – HD plazma, nelegovaná ocel

#### Nevýhody plazmového řezání:

- vysoké pořizovací náklady
- úkos řezné hrany
- oblá horní hrana
- široká řezná spára
- při řezání vznik dýmu, ozónu, oxidů dusíku a par kovů (Obr. 20)
- hluk 80 až 100 dB
- silné UV záření
- možnost řezat pouze omezeně nevodivé materiály



Obr. 20 Vznik dýmu při řezání plazmou [2]



### 1.2.6 Součásti vyráběné plazmovým řezáním [29], [38], [47], [49]

Tak jako u řezání pomocí laserového paprsku tak i pomocí plazmového paprsku se dají vyrábět součásti různých rozměrů, méně či více tvarově komplikovaných (Obr. 21), musí se ale brát ohled na širší řezné spáry a větší tepelně ovlivněné oblasti.



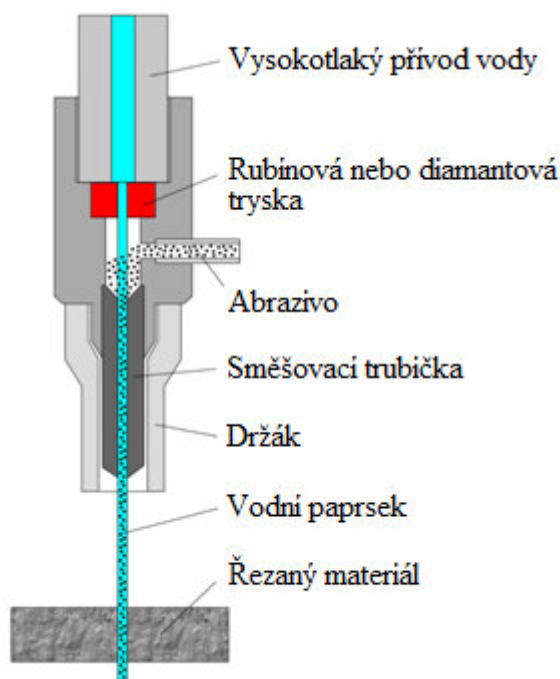
Obr. 21 Příklady dílců vyrobených pomocí plazmového paprsku [29], [38], [47], [49]

### 1.3 Výroba dílců pomocí vodního paprsku [37], [42], [45]

Řezání vodním paprskem je lehce ovladatelné, velmi univerzální a patří mezi nejrychleji se rozvíjející technologie řezání technických materiálů. I zde (tak jako u laserového a plazmového řezání) se provádí řezání pomocí CNC programování. První využití vodního paprsku k řezání se datuje od 50. let 20. století a jednalo se o experimentální řezání dřeva. Největší rozvoj nastal v 70. a na začátku 80. let 20. století, kdy firma Flow vyvinula řezání vysokotlakým vodním a hydroabrazivním paprskem. Nejdříve tato metoda byla určena pro vojenský a kosmický průmysl, později se rozšířila do všech oblastí průmyslu.

#### 1.3.1 Řezný proces [5], [37], [41], [42], [45]

Pomocí vodního paprsku lze řezat libovolné komplikované tvary různých rozměrů a hlavně jakýkoli materiál, např. oceli (konstrukční, legované, tepelně zpracované,...) slitiny Al, Ti, Cu, Ni apod. a dále je možnost řezat sklo, sklolaminát, kámen, keramiku, plasty, gumu, korek, dřevo, kompozity a mnoho dalších. Vodní paprsek je schopen řezat materiál až do tloušťky 200 mm. Řezání se provádí pomocí vody, která je vysokotlakým čerpadlem vháněna do vysokotlakého potrubí, odkud je voda dopravena k řezací hlavě, kde se z ní pomocí trysky stává řezný vodní paprsek o rychlosti až čtyřikrát větší než je rychlost zvuku. Pracovní tlak vody se pohybuje od 500 do 4 150 barů. Vysokotlaká čerpadla mají příkon v rozmezí od 11 do 150 kW a průtok vody od 1,2 až 5,2 l·min<sup>-1</sup>. Řez paprskem se vyznačuje kvalitní hranou řezu a přesností výřezu  $\pm 0,1$  mm·m<sup>-1</sup>. Řezaný materiál není tepelně ovlivněn a pokaždé se jedná o studený řez, což je velká výhoda oproti řezání pomocí laseru či plazmy. Samotný vodní paprsek reprezentuje řezný nástroj. Princip řezání (abrazivním) vodním paprskem je znázorněn na Obr. 22.



Obr. 22 Princip řezání abrazivním vodním paprskem [37]

### 1.3.2 Typy vodních paprsků [5], [45]

Existují dva typy vodních paprsků, a to čistý a abrazivní (vodní paprsek s příměsí). Čistý vodní paprsek má šířku 0,15 až 0,30 mm a abrazivní vodní paprsek 0,80 až 1,50 mm. Po vykonání řezu se v lapači (vaně) umístěném pod řezaným materiálem zachycuje abrazivo a směs vody.

#### Čistý vodní paprsek [41], [44], [45]

Řezání čistým vodním paprskem je původní typ řezání materiálu pomocí vody, kde voda proudí nadzvukovou rychlostí (až  $1\,100\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a rozrušuje materiál. První komerční použití čistého vodního paprsku se uskutečnilo na začátku 70. let 20. století a šlo o řezání vlnité lepenky. Čistý vodní paprsek je určený pro řezání měkkých materiálů (plasty, dřevo, guma, korek, hedvábný papír, jednorázové pleny, části automobilových interiérů...). Při řezání hedvábných papírů a jednorázových plen se na nich vytváří méně vlhkosti, než při doteku člověkem případně jeho dýcháním na daný materiál. Řezání čistým vodním paprskem je vhodné pro nepřetržitý provoz. Princip a ukázka řezání čistým vodním paprskem je znázorněn na Obr. 23.

Základní rysy řezání čistým vodním paprskem:

- řezání měkkých materiálů - do 100 mm tloušťky  
(izolace skelných vláken až 610 mm tloušťky)
- možnost řezat velmi tenké materiály
- malá šířka vodního paprsku – 0,15 až 0,30 mm (úzká řezná spára)
- velmi přesná geometrie
- malé množství odpadu
- nepřetržitý provoz
- vysoká řezná rychlost (až  $20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ )
- řez bez vzniku tepla – bez tepelně ovlivněné oblasti řezaného materiálu
- snadné uchycení řezaných materiálů
- velmi malé řezné síly
- snadná automatizace



Obr. 23 Princip a ukázka řezání čistým vodním paprskem [44]

### Abrazivní vodní paprsek [5], [41], [43], [45]

Abrazivní vodní paprsek je vodní paprsek s příměsí brusného prášku – abraziva. Abrazivo se volí dle tvrdosti řezaného materiálu a nejčastěji se používá přírodní olivín nebo granát. Paprsek schopen díky své vysoké energii řezat tvrdší materiál (kovy, kámen, sklo, keramika, kompozity apod.). U abrazivního vodního paprsku rozrušují materiál abrazivní částice, které jsou urychlovány proudem vody. Výhoda abrazivního vodního paprsku je stokrát (možná až tisíckrát) silnější brusná síla než erozivní síla u čistého vodního paprsku. Abrazivní vodní paprsek je schopen řezat materiály mírně tvrdší než je keramika s velkým množstvím oxidu hlinitého – korundu. Princip a ukázka řezání abrazivním vodním paprskem je znázorněn na Obr. 24.

Základní rysy řezání abrazivním vodním paprskem:

- řezání tvrdých materiálů - do 200 mm tloušťky
- možnost řezat velmi tenké materiály
- možnost řezat materiál ve svazcích
- univerzální technologie
- možnost rychle přepínat mezi abrazivním a čistým vodním paprskem
- možnost přepínat mezi použitím jedné či více řezných hlav
- jedno seřízení paprsku skoro na všechny úkony abrazivního řezání
- zmenšené náklady na následné operace
- malá šířka vodního paprsku – 0,80 až 1,50 mm (úzká řezná spára)
- velmi přesná geometrie
- malé množství odpadu
- žádný nebo malý otřep
- řez bez vzniku tepla – bez tepelně ovlivněné oblasti řezaného materiálu
- bez mechanického pnutí
- snadné uchycení řezaných materiálů
- velmi malé řezné síly
- snadná automatizace



Obr. 24 Princip a ukázka řezání abrazivním vodním paprskem [43]



### 1.3.3 Stroje [36]

Existuje mnoho výrobců strojů na řezání vodním paprskem, a to Flow, MicroStep, Bystronic, KMT Waterjet Systems Inc., Maximator JET GmbH a mnoho dalších. Firma Bystronic má dlouholeté zkušenosti ve vývoji a výrobě výkonných zařízení pro řezání vodním paprskem neboli řezání za studena. Firma nabízí hned několik zařízení dělicích se do různých kategorií (sérií), např. ByJet Pro – nejvýkonnější stroje, ByJet Classic – maximální spektrum použití, ByJet Pro L – řezání malých i velkých dílů,...

#### ByJet Classic 3015 [7], [8]

Jedná se o úsporné, přesné a funkční zařízení pro řezání pomocí vodního paprsku pro jakákoli standardní využití. Základní technické údaje zařízení ByJet Classic 3015 jsou uvedeny v Tab. 4 a zařízení je zobrazeno na Obr. 25.

Základní rysy zařízení:

- přesné dávkování řezacího písku pomocí CNC řízení
- vysoké polohovací a řezné rychlosti a imponující osová dynamika
- možnost zapínat řezací hlavy jednotlivě
- automatický rozestup řezacích hlav
- automatické sledování toku písku
- vrtací vřeteno s CNC řízením – možnost předvrtávání drahých materiálů
- neustálá regulace vzdálenosti trysky
- možnost obnovení procesu po přerušení řezání
- balíček programů CAD/CAM Bysoft – snadné začlenění do výrobních procesů

Tab. 4 Základní technické údaje zařízení ByJet Classic 3015 [8]

Řezací hlavy	1 nebo 2
Maximální rychlost polohování, souběžně s osou	60 m·min <sup>-1</sup>
Odchylka polohy	± 0,08 mm/osa
Rozptyl polohy	± 0,025 mm/osa
Pracovní rozsah pro plošné dělení	3 048 x 1 524 mm
Max. hmotnost obrobku, plochý díl	790 kg·m <sup>-2</sup>
Max. tloušťka obrobku	200 mm



Obr. 25 ByJet Classic 3015 [7]

### 1.3.4 Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem [30], [42], [44], [45]

#### Výhody řezání vodním paprskem:

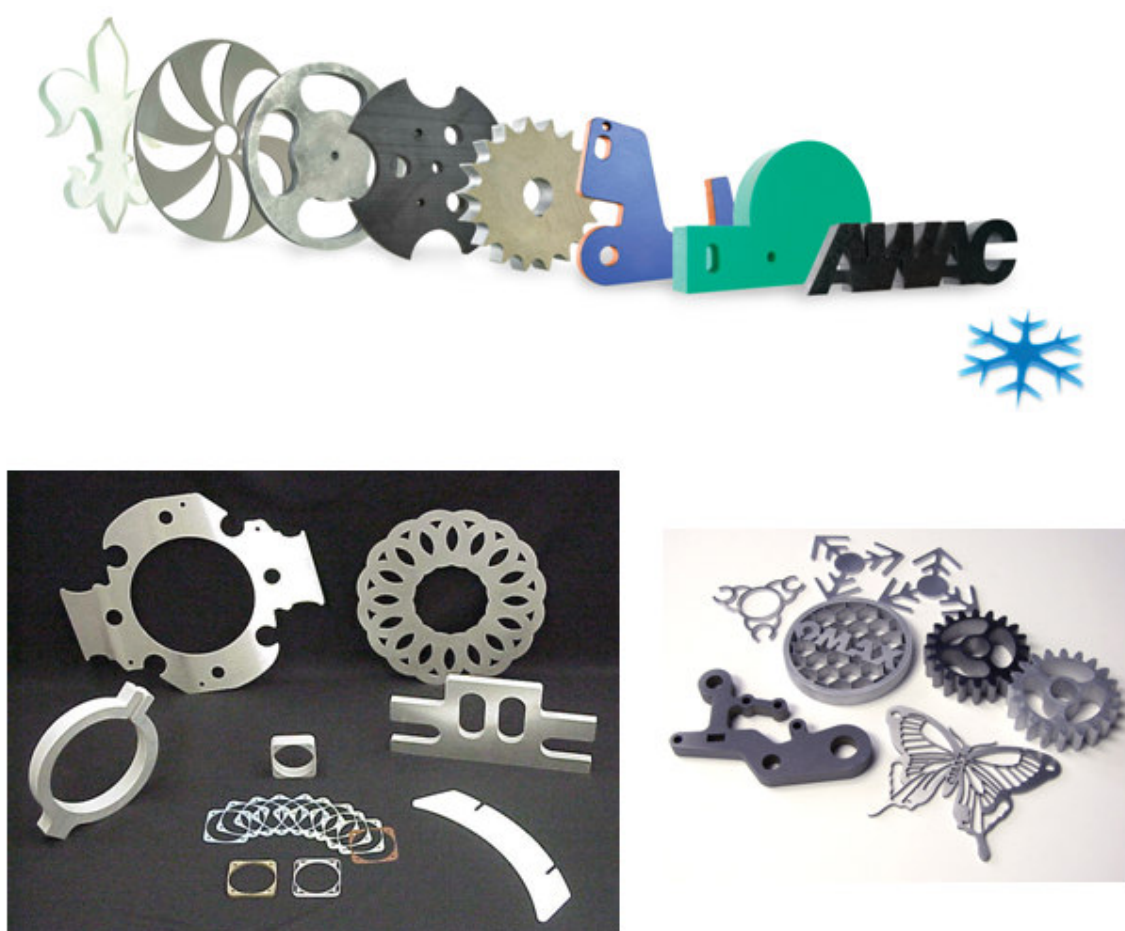
- možnost řezat jakýkoli materiál (kovy, sklo, kámen, keramiku, plasty, dřevo,...)
- možnost řezat až do tloušťky 200 mm
- možnost řezat velmi tenké materiály
- řez bez vzniku tepla – bez tepelně ovlivněné oblasti řezaného materiálu
- malá šířka vodního paprsku – úzká řezná spára
- lze řezat jakýkoli tvar – omezení je kruhový průřez paprsku
- čisté hrany
- kvalitní řezné plochy
- řez bez porušení povrchové úpravy (broušení, leštění,...)
- vertikální řezání
- lze provést společný řez – dílce položené přiléhavě vedle sebe
- snadné uchycení řezaných materiálů
- velmi malé řezné síly
- možnost použití více hlav najednou
- snadná automatizace
- malé množství odpadu
- nevznikají škodlivé zplodiny

#### Nevýhody řezání vodním paprskem:

- vysoké pořizovací a provozní náklady (provozní náklady ve srovnání s plazmou 1:5 až 1:20)
- u tvrdších materiálů poměrně malá řezná rychlost
- kontakt s vodou popř. i s abrazivem – bez ošetření řezné plochy nastává povrchová koroze, u smáčivých materiálů delší doba sušení, apod.
- nemožnost vyrábět dílce menších rozměrů (přibližně pod 30 až 50 mm) – lze řešit můstky
- hlučné řezání
- omezené 3D řezání
- nemožnost ručního řezání

### 1.3.5 Součásti vyráběné vodním paprskem [16], [37], [54]

Tak jako u řezání pomocí laserového paprsku či plazmy tak i pomocí vodního paprsku se dají vyrábět součásti různých rozměrů, méně či více tvarově komplikovaných (Obr. 26)



Obr. 26 Příklady dílců vyrobených pomocí vodního paprsku [16], [37], [54]

## 1.4 Výroba dílců pomocí vysekávání [27], [53]

Vysekávání je beztržkové dělení plochých materiálů, např. plechu. Metoda slouží k výrobě dílců složitých tvarů, které nejdou zhotovit klasickým stříháním, ale lze také vyrábět jednoduché dílce, např. těsnění, podložky,... Vysekávání je v některých situacích levnější varianta oproti řezání laserovým paprskem. Výhodou vysekávání je, že nedochází ke vzniku tepla, tím pádem nevzniká tepelně ovlivněná oblast vysekávaného materiálu. Nevýhodou je nutné použití dokončovacích operací (např. obrysového frézování) pro získání přesných rozměrů a tvarů součástky.

Materiály vhodné k vysekávání:

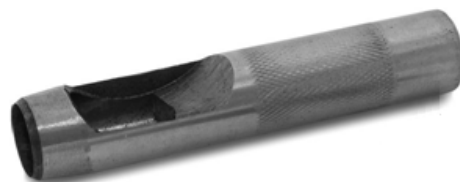
- ocelové, měděné a hliníkové plechy
- guma
- některé měkké plasty

Druhy sekání:

- ruční
- strojní

Ruční [50], [53]

Materiál je dělen jednobřitým nástrojem nazývaným výsečník (Obr. 27). Výsečník se používá k vysekávání neboli ražení otvorů a k výrobě instalatérského těsnění. Princip spočívá v úderu kladivem na jednu stranu výsečníku proti měkké podložce (např. dřevěné nebo silonové desce), poté se druhý konec, který je vytvrzený a broušen pod úhlem 16° až 20°, zaryje do děleného materiálu.



Obr. 27 Výsečník [50]

Strojní [51], [53]

Strojní vysekávání se provádí na vysekávacích lisech a je určeno k prorážení a děrování různých otvorů či tvarů speciálním nástrojem - raznicí. Lze vysekávat do tloušťky plechu až 6 mm. Výhoda tkví v postupovém ražení a strojním posuvu. U velkosériové výroby se nechává zhotovit výsekový nástroj, který může daný díl vyseknout najednou. U kusové výroby se vysekávání provádí dostupnými raznicemi na více výseků (zdvihů lisu).

Stroje [3], [4], [12]

Výrobci vysekávacích strojů jsou např. Amada, Trumpf, Euromac, Durma a další.

Amada - Aries 245 II

Jedná se o vysekávací a zároveň děrovací stroj, jehož základní technické údaje jsou uvedeny v Tab. 5.



Obr. 28 Vysekávací zařízení Amada – Aries 245 II [3], [4]

Tab. 5 Základní technické údaje zařízení Amada - Aries 245 II [12]

Hmotnost	7 500 kg
Nosnost	20 tun
Max. tloušťka standardní oceli	4,5 mm
Max. váha plechu	50 kg
Pracovní rozsah (X x Y)	1 000 x 1 270 mm
Polohování	1 000 x 2 540 mm
Přesnost polohování	± 0,01 mm
Max. úderů za minutu	180
Napájecí zdroj	380 V, 50 Hz

#### Výhody vysekávání [27]

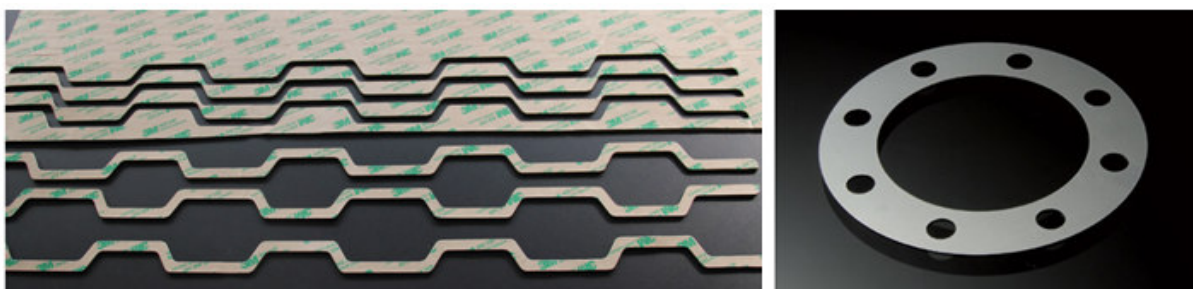
- řez bez vzniku tepla – bez tepelně ovlivněné oblasti řezaného materiálu
- v některých situacích jde o levnější variantu výroby než řezání laserem
- rychlost vysekávání

#### Nevýhody vysekávání [50], [51]

- možnost vysekávat pouze do tloušťky 6 mm
- nutnost zhotovení výsekového nástroje popř. výsek na vícekrát
- opotřebování nástrojů

#### Součásti vyráběné vysekáváním [51], [52]

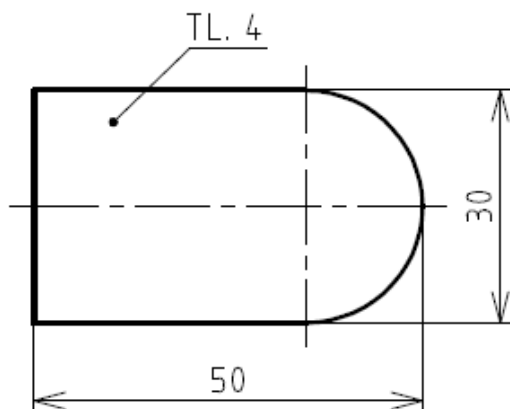
Pomocí vysekávání se dají vyrábět součásti různých rozměrů a tvarů (Obr. 29), musí se ale brát ohled na maximální možnou tloušťku výseku.



Obr. 29 Příklady dílců vyrobených pomocí vysekávání [51], [52]

## 1.5 Porovnání vybraných metod

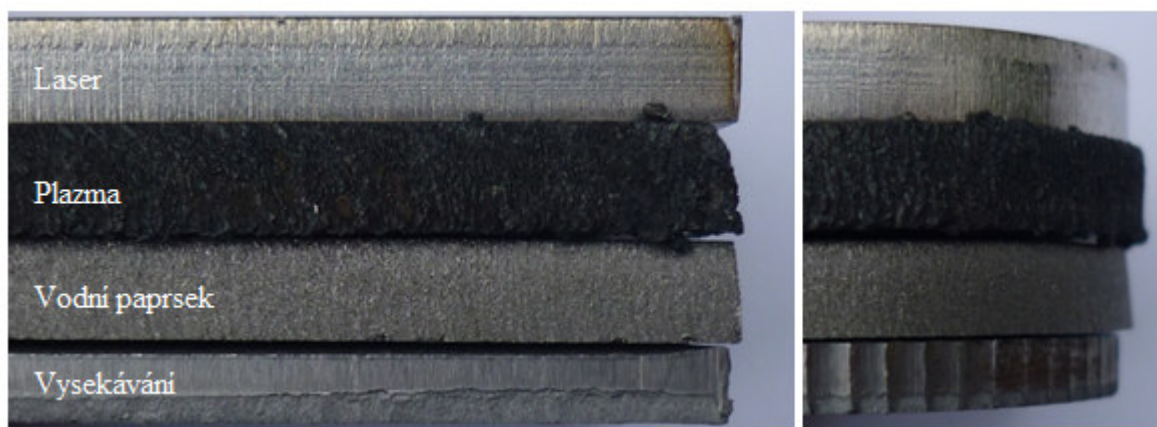
Navrhnutý dílec z nerez oceli (Obr. 30) byl vyroben všemi čtyřmi metodami. Pomocí laseru, plazmy a vodního paprsku výrobu dílce obstarala firma TOPSTEEL s.r.o. Dílec řezaný pomocí laseru byl vyroben na stroji firmy Trumpf Trulaser 3030 o výkonu 3 200 W



za 6 sekund. Plazmou byl dílec zhotoven za 12 sekund na stroji Mira od firmy Vanad 2000 a.s. a vyřezán vodním paprskem byl na stroji RT-4020-1-NK-7-11 od firmy Rychlý TOM s.r.o. za 60 sekund při tlaku 4 550 barů a spotřebě vody  $2,6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Dílec vyrobený metodou vysekávání obstarala firma Slovácké strojírny, a.s., v závodě v Zábřehu na Moravě na stroji Aries 245 II od firmy Amada za 12 sekund. Jediné omezení u vysekávání byla tloušťka 3 mm.

Obr. 30 Navrhnutý dílec z nerez oceli

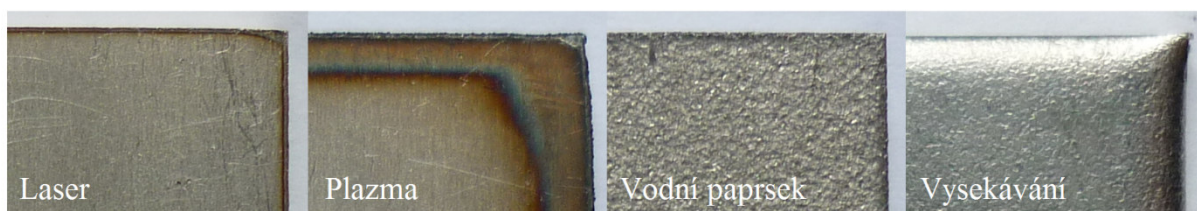
Na Obr. 31 jsou ukázány řezné plochy jednotlivých metod při rovném a kruhovém řezu. U jednotlivých metod lze vidět kvalita řezu. Při řezání pomocí laserového a vodního paprsku se docílilo kvalitní řezné plochy. U plazmového řezání lze vidět nekvalitní řez a také vzniklé otřepy. U metody vysekávání lze na řezné ploše vidět zónu odlomení, zaoblení hran a zubatý kruhový výřez, což bylo zapříčiněno vysekáním na několik výseků s použitím dostupných raznic firmy. Nebyl zde použit výsekový nástroj, kterým by se daná součást zhotovila na jeden výsek (zdvih lisu).



Obr. 31 Řezné plochy jednotlivých metod při rovném a kruhovém řezu



Tepelně ovlivněné oblasti jsou ukázány na Obr. 32. U metody řezání vodním paprskem a vysekávání žádná tepelně ovlivněná oblast nastala a u laserového řezání vznikla jen velmi malá. Největší tepelně ovlivněná oblast je u plazmového řezání. Následné porovnání podle různých kritérií a pořadí jednotlivých vyrobených dílců je v Tab. 6. Fotografie jednotlivých dílců jsou v přílohách 1 až 4.



Obr. 32 Tepelně ovlivněné oblasti daných metod

Tab. 6 Porovnání a pořadí jednotlivých vyrobených dílců

Metoda	Laser	Plazma	Vodní paprsek	Vysekávání
Kvalita řezu	1	4	2	3
Čas zhotovení	1	2	4	2
TOO	2	4	1	1
Otřepy	1	4	1	2
Zaoblení hran	1	1	1	3
Rozměrová přesnost	1	3	1	2
Přesnost geometrie	1	4	1	3
Celkem bodů	8	22	11	16
Pořadí	<b>1.</b>	<b>4.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>

1 ... nejlepší, 4 ... nejhorší, TOO – tepelně ovlivněná oblast

## 1.6 Závěr

Nekonvenční technologie výroby rovinných součástí z plechu patří světově mezi hojně využívané. Všechny uvedené metody (řezání laserem, plazmou, kyslíkem a vysekávání) jsou schopny vytvořit potřebné dílce velmi rychle s poměrně dobrými vlastnostmi řezu, avšak každá z nich je určena pro různé druhy a tloušťky materiálů a pro rozdílné složitosti řezaných (vysekávaných) tvarů.

Z kapitoly 1.5 (Porovnání vybraných metod) je patrné, že pro navrhnutý dílec je nejvhodnější metoda výroby pomocí laserového paprsku. Tato metoda poskytne dostatečnou kvalitu řezu, zanedbatelnou tepelně ovlivněnou oblast, přesnou geometrii a mnoho dalšího za velmi krátkou výrobní dobu. Výroba dílce pomocí vodního paprsku je na tom obdobně. Rozdíl oproti výrobě laserovým paprskem je v trochu horší kvalitě řezu, ale výroba vodním paprskem je bez tepelně ovlivněné oblasti. V porovnání v kapitole 1.5 vyšlo řezání vodním paprskem na druhém místě hned za laserovým paprskem, hlavním důvodem byla několikanásobně delší výrobní doba. Třetí příčku obsadila metoda vysekávání, kde bylo patrné zhoršení kvality řezu oproti prvním dvěma metodám. Dále při tomto způsobu výroby došlo k zaoblení hran a k zubatému kruhovému řezu. Pozitivní na metodě vysekávání je krátká výrobní doba dílce a absence tepelně ovlivněné oblasti. Poslední místo obsadila metoda výroby dílců pomocí plazmy, protože daný dílec měl velmi nekvalitní řez, velkou tepelně ovlivněnou oblast, otřepy a velmi nepřesnou geometrii a rozměrové parametry.



## Seznam použitých zdrojů

1. 2D laserová řezací zařízení. *TRUMPF Česká republika* [online]. © 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni.html>
2. Advantages of Plasma Cutting. *Large Plasma Cutting - Advanced Profiles* [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.largeplasmacutting.com>
3. Amada. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 12.02.2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Amada.svg>
4. ARIES-245 II. *Fskeshi* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.fskeshi.com/Aries-245/Aries245II.htm>
5. BOUDA, Luděk. Řezání vodním paprskem. *MM spektrum* [online]. 09.07.2008 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
6. BŘICHNÁČ, Pavel. Plazmové technologie. *Aldebaran bulletin* [online]. 17.05.2004 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_20\\_plt.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_20_plt.html)
7. ByJet Classic. *Bystronic* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://bystronicinc.com/products/water/byjet\\_classic.php](http://bystronicinc.com/products/water/byjet_classic.php)
8. ByJet Classic. *Bystronic* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://www.bystronic.cz/cutting\\_and\\_bending/cz/cs/products/water/ByJet\\_Classic/index.php](http://www.bystronic.cz/cutting_and_bending/cz/cs/products/water/ByJet_Classic/index.php)
9. CNC stroje pro termické dělení materiálů. *Vanad* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.vanad.cz/stroje>
10. Časový přehled. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. © 2005 – 2012 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/casovy-prehled>
11. Demineralizovaná voda. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 18.4.2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Demineralizovaná\\_voda](http://cs.wikipedia.org/wiki/Demineralizovaná_voda)
12. Děrovačka cn AMADA ARIES 245 II. *EXAPRO: Tržiště pro použité stroje* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.exapro.cz/derovacka-cn-amada-aries-245-ii-p10314028>
13. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 4. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
14. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

15. HEINRICH, Michal. Plazmové řezání. *Svět svaru* [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/PlasmŘezání\\_2006.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/PlasmŘezání_2006.pdf)
16. HIGH PRESSURE PERFORMANCE. *Waterjet Cutting: Metal Tile Stone Glass* [online]. © 2009 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://cuttingriver.com/gallery.html>
17. Home. *Laser Steel: service center* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.lasersteel.eu>
18. Hy-definition plasma cutting. *Source metals* [online]. © 2001-2007 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.sourcemetals.com/web-content/hy-def-plasma.html>
19. JANATA, Marek. Technické plyny pro řezání plazmou: Co je to plazma?. *Svět svaru* [online]. Praha, 2007 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/TP\\_plasma\\_2007.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/TP_plasma_2007.pdf)
20. KUBIČEK, Jaroslav. *Technologie II - část svařování: Speciální metody tavného svařování, tlakové svařování*. Brno, 2006. 69 s. Syllabus přednášek. Vysoké učení technické v Brně.
21. KUSALA, Jaroslav. JAK FUNGUJE LASER: Typy laserů. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
22. Laserové a plazmové řezání. *Vysoká škola báňská* [online]. 2009 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
23. LENFELD, Petr. Technologie plošného tváření: stříhání. *Katedra strojírenské technologie: Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/06.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm)
24. LUKÁŠEK, Jaromír. Laserové dělení materiálu. *Svařování v České republice* [online]. 10.5.2007 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>
25. MIRA: CNC pálicí stroj typ MIRA. *Vanad* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.vanad.cz/Mira>
26. MORAVEC, Ján. *Nekonvenčné technológie tvárnenia kovov*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2003, 144 s. ISBN 80-8070-094-X.
27. O firmě. *HSP Technology s.r.o.* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.hsptechnology.cz/cs>
28. Obrázkový archiv. *Svařování a pálení Česká Republika* [online]. © 2009 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/news/image-archive.cfm>
29. Plasma cutting. *Prvá zvaračská, a. s.* [online]. © 2009 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.pzvar.sk/en/produkty/sluzby-pre-priemysel/plasma-cutting>

30. Plazma přednosti a nevýhody. *PLAZMA CZ* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.plazmacz.cz/plazma-prednosti-a-nevyhody>
31. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění - 4. díl: 5 Obrábění paprskem fotonů - laserem. *MM spektrum* [online]. 19.3.2008 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
32. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění - 5. díl: 5.5.1 Svařování laserem. *MM spektrum* [online]. 12.05.2008 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
33. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění - 8. díl: 8 Obrábění paprskem iontů - plazmatem. *MM spektrum* [online]. 08.10.2008 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-8-dil.html>
34. Řezání laserem. *LASER TECH* [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.laser-tech.cz/rezani-laserem>
35. Řezání laserem. *Las-pro s.r.o.* [online]. © 2010 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.las-pro.cz/cz/rezani-laserem>
36. Řezání vodním paprskem. *Bystronic* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://www.bystronic.cz/cutting\\_and\\_bending/cz/cs/products/water/index.php](http://www.bystronic.cz/cutting_and_bending/cz/cs/products/water/index.php)
37. Řezání vodním paprskem. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 12.4.2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání\\_vodním\\_paprskem](http://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání_vodním_paprskem)
38. Sheet Metal Plasma Cutting Machines-Legend Series. *SteelTailor* [online]. © 2010 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.opetrol.com/cnc-cutting-machines/legend-sheet-metal-plasma-cutting-machines.html>
39. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM spektrum* [online]. 9.7.2008 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
40. Technické plyny. *ARTWELD: vše pro svařování* [online]. © 2011 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.artweld.cz/technicke-plyny.html>
41. Technologie řezání vodním paprskem. *KovoJuza* [online]. © 2010 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.kovojuza.cz/vodni-paprsek.html>
42. Technologie Vodního Paprsku: Proč stroj pro řezání vodním paprskem. *Flow* [online]. © 2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/why-waterjet.aspx>
43. Technologie Vodního Paprsku: Řezání abrazivním vodním paprskem. *Flow* [online]. © 2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/abrasive-waterjet.aspx>

44. Technologie Vodního Paprsku: Řezání čistým vodním paprskem. *Flow* [online]. © 2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/pure-waterjet.aspx>
45. Technologie: Co je to vysokotlaký vodní paprsek?. *CHPS s.r.o.* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie.html>
46. TruLaser 3030/3040. *TRUMPF Česká republika* [online]. © 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni/trulaser-serie-3000/trulaser-3030-3040.html>
47. Tvarové výpalky z plechu. *KRAJn* [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.krajn.sk/index.php?action=vypalky>
48. URBANO, Dominic. Laser cutting. *Gold medal productions* [online]. 30.8.2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.customlaser.net/custom-cut/laser-cut-clock-gears-005>
49. Výroba výpalků. *DK Styl: řezání plazmou a laserem* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.dkstyl.com/vyroba-vypalku/?pageid=70>
50. Výsečník. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 28.1.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Výsečník>
51. Výsečník. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 28.1.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Výsečník>
52. Vysekávání. *Kalina industries s.r.o.* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.kalina.cz/cs/sluzby/vysekavani>
53. Vysekávání. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 6.12.2011 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vysekávání>
54. Waterjet Cutting Services. *Karnel Incorporated* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.karnel.com/waterjetcutting.htm>
55. Waterjet Machining. *Water cutting machine* [online]. 8 October 2011 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.waterjet-cutting.blogspot.com>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

2D	dvoudimenzionální (dvourozměrný)
3D	trojdimenzionální (trojrozměrný)
CAD	Computer-Aided Design (počítačem podporované projektování)
CAM	Computer-Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
CNC	Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem)
HD plazma	High Definition plazma (plazma s vysokou koncentrací paprsku)
HF	high-frequency (vysokofrekvenční)
LCD	liquid crystal display (displej z tekutých krystalů)
RF	radiofrekvenční
TIG	Tungsten Inert Gas (svařování wolframovou elektrodou)
TOO	tepelně ovlivněná oblast
UV	ultraviolet (ultrafialové)
YAG	yttrito-hlinitý granát

## **Seznam příloh**

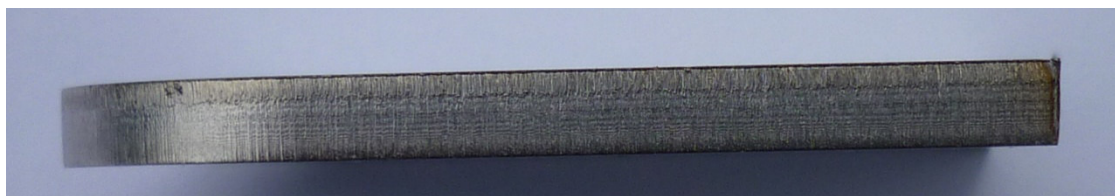
Příloha 1: Dílec vyrobený pomocí laserového paprsku

Příloha 2: Dílec vyrobený pomocí plazmového paprsku

Příloha 3: Dílec vyrobený pomocí vodního paprsku

Příloha 4: Dílec vyrobený pomocí vysekávání

Příloha 1 Dílec vyrobený pomocí laserového paprsku



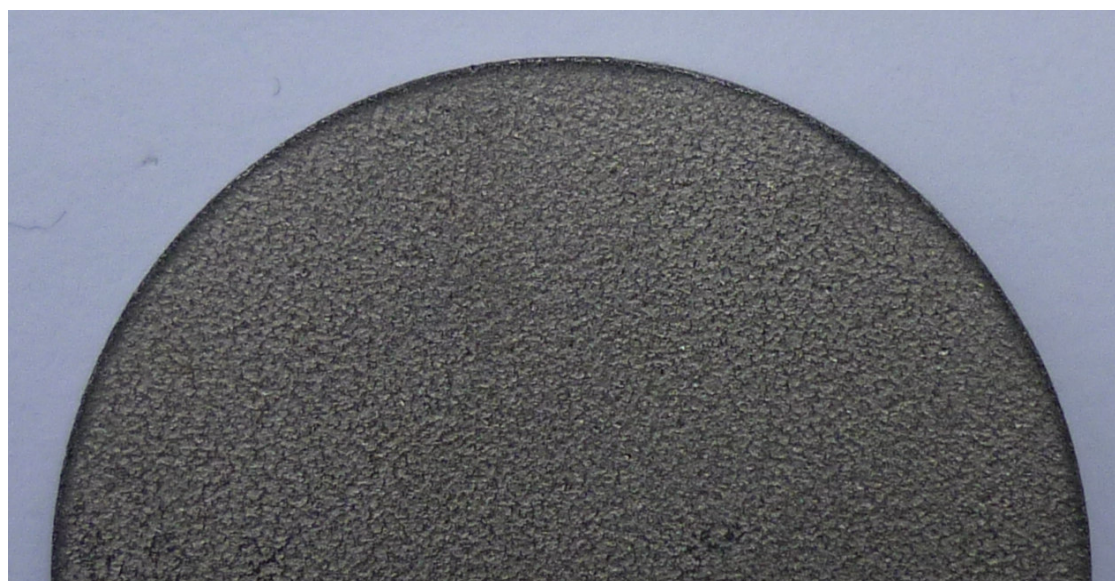


Příloha 2 Dílec vyrobený pomocí plazmového paprsku





Příloha 3 Dílec vyrobený pomocí vodního paprsku



Příloha 4 Dílec vyrobený pomocí vysekávání

